

粉煤灰掺量对混凝土工作性能的影响分析

江宏涛¹ 黄贤海²

1.浙江省建材集团固碳科技有限公司 浙江 杭州 310011

2.浙江省建材集团有限公司固碳混凝土分公司 浙江 湖州 313219

【摘要】：粉煤灰作为燃煤电厂的工业副产物，将其掺入混凝土中不仅能实现固废资源化利用，降低工程成本，还能有效改善混凝土的工作性能，契合建筑行业绿色低碳发展需求。本文结合某高层住宅工程实际施工案例，整合工程试验数据与相关研究成果，系统分析粉煤灰掺量对混凝土流动性、黏聚性、保水性及凝结时间等核心工作性能的影响规律，探讨工程中影响粉煤灰作用效果的关键因素，总结施工中合理控制粉煤灰掺量的技术要点，为同类工程中合理确定粉煤灰掺量、优化混凝土配合比提供理论参考与技术支撑。

【关键词】：粉煤灰；掺量；混凝土；工作性能；高层住宅工程

DOI:10.12417/2811-0528.26.12.003

1 引言

随着建筑行业的快速发展与“双碳”目标的推进，混凝土作为用量最大的建筑材料，其性能优化与绿色化发展成为研究热点。某高层住宅工程为框架剪力墙结构，地上33层、地下2层，总建筑面积约4.2万m²，工程主体结构混凝土用量约1.8万m³，设计强度等级为C30~C50，其中梁、板、柱等构件对混凝土工作性能要求较高，需兼顾流动性、黏聚性与保水性，满足高空浇筑、泵送施工需求。本文结合该高层住宅工程实际，系统梳理粉煤灰掺量对混凝土工作性能的影响规律，明确合理掺量范围，对推动粉煤灰在同类高层住宅工程中的科学应用、提升工程质量具有重要的理论与实践意义。

2 粉煤灰改善混凝土工作性能的作用机理

2.1 形态效应

该工程所用粉煤灰中含有大量球形玻璃微珠，这些微珠表面光滑，能在混凝土浆体中起到“滚珠轴承”的作用，减少水泥颗粒、骨料之间的内摩擦阻力，降低浆体黏度，从而提升混凝土的流动性，同时减少拌合水用量，适配工程泵送施工中对混凝土流动性的要求。当粉煤灰中球形颗粒占比较高时，这种效应更为显著，可使混凝土坍落度明显提升，保障高空泵送过程中不堵管、不离析。

2.2 微集料效应

该工程混凝土骨料采用5~25mm连续级配碎石，粉煤灰颗粒粒径细小，能有效填充水泥颗粒与骨料之间的空隙，优化混凝土浆体的颗粒级配，使浆体结构更加致密，减少游离水分的迁移，从而降低泌水现象，提升混凝土的黏聚性，避免高空浇筑过程中出现离析、分层等问题，保障构件浇筑质量。

2.3 火山灰效应

粉煤灰中的活性二氧化硅、三氧化二铝等成分，会与水泥水化产生的氢氧化钙发生二次水化反应，生成水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝产物。这种反应具有滞后性，早期反应缓慢，会间接影响水泥水化速率，适配工程施工中对凝结时间的要求，避免浇筑后过快凝结影响振捣；后期反应充分，能进一步致密浆体结构，提升混凝土的长期工作性能与耐久性，满足高层住宅结构长期使用需求。

3 粉煤灰掺量对混凝土工作性能的影响

3.1 对流动性的影响

当粉煤灰掺量较低时，随着掺量增加，混凝土坍落度与扩展度逐渐增大。这是因为低掺量下，粉煤灰的球形玻璃微珠能充分发挥形态效应，减少浆体内摩擦阻力，同时其微集料效应填充水泥颗粒与骨料空隙，使浆体流动性提升。试验表明，当粉煤灰掺量在10%~20%之间时，混凝土坍落度较基准组提升10%~25%，扩展度提升15%~30%，流动性改善效果显著，能满足工程高空泵送施工需求，泵送过程中无堵管现象。

当粉煤灰掺量超过20%后，随着掺量继续增加，流动性提升幅度逐渐减小；当掺量超过40%时，坍落度与扩展度开始明显下降。这是因为高掺量下，粉煤灰替代水泥的比例过高，水泥水化产生的胶凝产物减少，浆体黏结力不足，同时大量粉煤灰颗粒的吸附作用会消耗更多游离水分，导致浆体黏度增大，流动性劣化。当掺量达到50%以上时，混凝土流动性急剧下降，甚至出现难以振捣、浇筑困难的情况，无法满足工程泵送施工要求，因此该工程中粉煤灰掺量不宜超过40%。

3.2 对黏聚性与保水性的影响

黏聚性与保水性是该高层住宅工程混凝土避免离析、泌水的关键，直接影响混凝土硬化后的强度与耐久性。该工程通过目测观察浆体均匀性、测试泌水率等指标，评价不同粉煤灰掺量对混凝土黏聚性与保水性的影响。低掺量粉煤灰（10%~30%）能显著提升混凝土的黏聚性与保水性。低掺量下，粉煤灰的微集料效应优化浆体级配，填充水泥颗粒与骨料空隙，减少游离水分，使浆体与骨料结合更加紧密，避免出现骨料分离、表面泌水等现象。此时混凝土浆体均匀、黏稠，振捣时无明显离析，泌水率较基准组降低30%~50%，保水性良好，能满足高空浇筑过程中对混凝土工作性能的要求，保障构件浇筑质量。

当粉煤灰掺量超过30%后，黏聚性与保水性开始逐渐下降；掺量超过40%时，下降趋势更加明显。高掺量下，水泥用量减少，水化胶凝产物不足，浆体黏聚力减弱，无法有效包裹骨料，易出现离析、分层现象，泌水率显著上升。当掺量达到50%以上时，混凝土浆体松散，黏聚性极差，浇筑后易出现表面起砂、底部沉砂等问题，严重影响该高层住宅工程结构质量，因此该工程中粉煤灰掺量控制在30%以内为宜。

3.3 对凝结时间的影响

混凝土的凝结时间直接影响该高层住宅工程施工工序的衔接，尤其是梁、板、柱连续浇筑施工，初凝时间过长会导致后续浇筑与前期混凝土结合不紧密，初凝时间过短则会影响振捣密实度。粉煤灰掺量对凝结时间的影响主要与火山灰效应的滞后性相关，整体呈现“随掺量增加而延长”的趋势，但不同水胶比条件下存在一定差异，结合该工程施工工况具体分析如下。在标准稠度用水量下，随着粉煤灰掺量增加，混凝土的初凝与终凝时间均逐渐延长。这是因为粉煤灰的火山灰反应初期会消耗水泥水化产生的氢氧化钙，间接降低水泥水化速率，同时粉煤灰中含有的微量缓凝性杂质会抑制水泥水化，导致凝结时间延缓。试验表明，当掺量为20%时，初凝时间较基准组延长10%~15%，终凝时间延长15%~20%，能满足工程连续浇筑施工需求；当掺量达到50%时，初凝时间延长40%以上，终凝时间延长50%以上，会导致脱模时间延后，影响施工进度，不符合工程工期要求。

在固定水胶比条件下，当粉煤灰掺量不超过20%时，凝

结时间延长趋势不明显；当掺量超过20%后，随掺量增加，凝结时间反而逐渐缩短。这是因为固定水胶比下，高掺量粉煤灰会使浆体中有效胶凝材料浓度降低，水化反应速率加快，从而缩短凝结时间。结合该工程泵送施工需求，固定水胶比为0.35时，粉煤灰掺量控制在20%左右，凝结时间最适配施工节奏。

3.4 不同粉煤灰掺量对混凝土工作性能的综合影响

为更直观体现粉煤灰掺量对该高层住宅工程C30混凝土工作性能的影响，汇总不同掺量下混凝土的核心工作性能指标，具体如下表所示。

表1 核心工作性能指标

粉煤灰掺量(%)	坍落度(mm)	扩展度(mm)	泌水率(%)	初凝时间(h)	终凝时间(h)
0(基准组)	150	450	2.5	6.5	10.2
10	168	510	1.8	7.2	11.5
20	182	580	1.2	7.8	12.3
30	175	550	1.5	8.5	13.1
40	160	490	2.1	9.8	15.6
50	142	430	3.0	11.2	18.5

由上表可知，结合该高层住宅工程施工需求，粉煤灰掺量在20%左右时，混凝土的综合工作性能最佳，完全适配高空泵送、连续浇筑等施工工况，同时能兼顾经济性与环保性；掺量在10%~30%之间时，可根据不同构件浇筑需求灵活调整；掺量超过30%后，各项工作性能逐渐劣化，无法满足主体结构施工要求；掺量达到50%时，严禁用于工程施工。

4 结论

结合某高层住宅工程施工实践与试验数据，通过系统分析粉煤灰掺量对混凝土工作性能的影响及相关作用机理。粉煤灰对混凝土工作性能的改善源于形态效应、微集料效应与火山灰效应的协同作用，选用Ⅱ级粉煤灰，能有效优化该高层住宅工程混凝土浆体结构，提升工作性能，适配高空泵送、连续浇筑等施工需求。工程中，粉煤灰品质、水胶比、骨料级配及养护条件等因素会显著影响粉煤灰的作用效果，需严格控制粉煤灰质量，合理调整水胶比与骨料级配，加强养护管理，才能充分发挥粉煤灰的改善作用，保障工程质量。

参考文献:

- [1] 张聪.粉煤灰掺量对水下不分散混凝土流变及综合性能的影响[J/OL].建材世界,2026,(02):34-38+52[2026-04-20].
- [2] 侯永利,焦海峰,杨宏睿,等.初期养护温度影响下大掺量粉煤灰混凝土早期性能及强度预测[J/OL].建筑科学与工程学报,1-9[2026-04-20].
- [3] 古建贤,刘立国,高健继,等.不同掺量粉煤灰对混凝土性能影响及综合应用研究[J].科技与创新,2026,(04):137-139.